

А.В.БОРЦОВ, НТУ «ХПИ»

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕНИ КОММУТАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ НА ФОРМУ ИМПУЛЬСОВ НАПЯЖЕНИЯ НА НАГРУЗКЕ ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО ИСТОЧНИКА НАПЯЖЕНИЯ

Розглянуто вплив часу комутації напівпровідникових приладів на форму, амплітудні і часові параметри імпульсів напруги на навантаженні трансформаторного джерела. Встановлена залежність тривалості фронту імпульсу від власних параметрів джерела і часу комутації напівпровідникових приладів.

Influence of time of commutation of semiconductor devices is considered on a form, peak and temporal parameters of pulses of voltage in a load of transformer source. Dependence of duration of pulse front is set on the own parameters of source and time of commutation of semiconductor devices.

Постановка задачи. Импульсный высоковольтный трансформаторный источник для электрофизических установок содержит следующие узлы (рис. 1): источник энергии – однофазная или трехфазная сеть, сетевой выпрямитель, сглаживающий фильтр, однотактный или двухтактный инвертор напряжения, импульсный трансформатор, системы управления и измерений, нагрузка.

Сетевой выпрямитель, как правило, выполняется по мостовым схемам выпрямления – схема Греча для однофазной сети, схема Ларионова для трехфазной сети. В качестве выпрямителей можно использовать регулируемые одно – и трехфазные выпрямители.

Основными узлами силового контура импульсного трансформаторного источника являются: инвертор напряжения, преобразующий постоянное напряжение в импульсное и импульсный трансформатор, обеспечивающий в нагрузке требуемые параметры импульсов тока и напряжения.

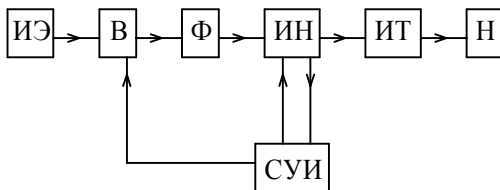


Рисунок 1 – Блок – схема импульсного трансформаторного источника:
ИЭ – источник энергии; В – сетевой выпрямитель; Ф – сглаживающий фильтр;
ИН – инвертор напряжения; ИТ – импульсный трансформатор; Н – нагрузка;
СУИ – системы управления и измерений

Для новых электрофизических установок, таких как высоковольтные генераторы импульсных напряжений с субнаносекундной длительностью фронта импульса, высокочастотные установки на основе импульсного коронного разряда предъявляются достаточно жесткие требования к собственным параметрам силового контура импульсного трансформаторного источника – минимальные значения активного сопротивления, собственной индуктивности и паразитной емкости. Разработка и широкое внедрение новых ферромагнитных материалов позволило существенно снизить указанные параметры и актуальным становится учет влияния времени коммутации полупроводниковых приборов на форму, амплитудные и временные характеристики импульсов напряжения в нагрузке.

Схема замещения силового контура импульсного трансформаторного источника отличается от известных [1] тем, что в ней наряду с параметрами схемы замещения импульсного трансформатора учитывается время включения и выключения полупроводникового ключа (рис. 2).

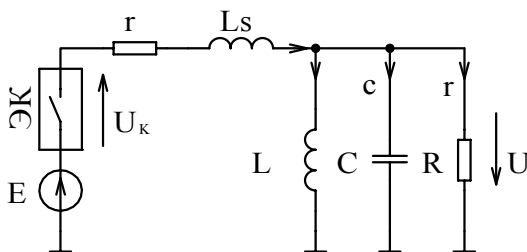


Рисунок 2 – Схема замещения силового контура импульсного трансформаторного источника: E – напряжение источника энергии; ЭК – полупроводниковый ключ (тиристор, транзистор); U_k – напряжение на ключе; $r = r_1 + r_n + r'_2$, r_1 – активное сопротивление первичной обмотки ИТ, r_n – сопротивление соединительных проводов, r'_2 – приведенное к первичной обмотке активное сопротивление вторичной обмотки; $L_s = L_{s1} + L_n + L'_{s2}$, L_{s1} – индуктивность рассеивания первичной обмотки, L_n – индуктивность соединительных проводов, L'_{s2} – приведенная к первичной обмотке индуктивность рассеивания вторичной обмотки; L_μ – индуктивность намагничивания ИТ; $C = C_1 + C'_2 + C_T + C'_H$, C_1 – емкость первичной обмотки ИТ, C'_2 – приведенная к первичной обмотке емкость вторичной обмотки ИТ, C_T – межобмоточная емкость ИТ, C'_H – приведенная к первичной обмотке емкость нагрузки; R – приведенное к первичной обмотке сопротивление нагрузки; U – приведенное к первичной обмотке напряжение на нагрузке

Время включения и выключения полупроводникового ключа будем учитывать заданием закона изменения напряжения на ключе:

$$U_k(t) = \begin{cases} E, t < 0; \\ E(1 - \frac{t}{t_{\text{вкл}}}), 0 < t < t_{\text{вкл}}; \\ 0, t_{\text{вкл}} < t < T_{\text{И}} - t_{\text{выкл}}; \\ E(1 - \frac{T_{\text{И}} - t}{t_{\text{выкл}}}), T_{\text{И}} - t_{\text{выкл}} < t < T_{\text{И}}; \\ E, t > T_{\text{И}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $t_{\text{вкл}}, t_{\text{выкл}}$ – время включения и выключения полупроводникового ключа;
 $T_{\text{И}}$ – длительность импульса.

Осциллограмма изменения во времени напряжения на ключе имеет вид (рис. 3).

Переходной процесс в силовом контуре импульсного трансформаторного источника описывается системой интегро-дифференциальных уравнений [2]:

$$\begin{cases} ri(t) + L_S \frac{di(t)}{dt} + u(t) = f(t); \\ i(t) = i_{\mu}(t) + i_c(t) + i_r(t); \\ i_{\mu}(t) = \frac{1}{L_{\mu}} \int_0^t u(t) dt + i_{\mu}(0); \\ i_c(t) = C \frac{du(t)}{dt}; \\ i_r(t) = \frac{u(t)}{R}, \end{cases} \quad (2)$$

и начальными условиями

$$\begin{cases} u(0) = 0; \\ i(0) = 0; \\ i_{\mu}(0) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$f(t) = \begin{cases} 0, t < 0; \\ \frac{E}{t_{\text{вкл}}} t, 0 < t < t_{\text{вкл}}; \\ E, t_{\text{вкл}} < t < T_{\text{И}} - t_{\text{выкл}}; \\ \frac{E}{t_{\text{выкл}}} (T_{\text{И}} - t), t > T_{\text{И}}. \end{cases} \quad (4)$$

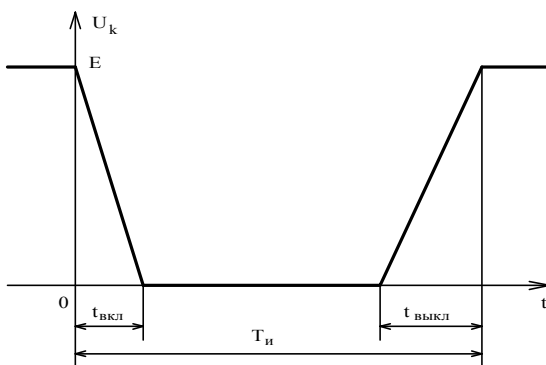


Рисунок 3 – Закон изменения во времени напряжения на ключе

Из (2) и (3) несложно получить дифференциальное уравнение и начальные условия для напряжения на нагрузке

$$\frac{d^3 u}{d\tau^3} + 2\xi \frac{d^2 u}{d\tau^2} + [1 + k_R(k_L - 1)] \frac{du}{d\tau} + \eta u = k_R \frac{df}{d\tau}; \quad (5)$$

$$u(0) = \frac{du(0)}{d\tau} = \frac{d^2 u(0)}{d\tau^2} = 0, \quad (6)$$

где $k_R = \frac{R}{r + R}$ – коэффициент передачи напряжения по сопротивлениям;

$k_L = \frac{L_\mu}{L_\mu + L_S}$ – коэффициент передачи напряжения по индуктивностям;

$\xi = \frac{\sqrt{k_R}}{2} \left(\frac{r}{\rho} + \frac{\rho}{R} \right)$ – коэффициент затухания контура;

$\rho = \sqrt{\frac{L_S}{C}}$ – характеристическое сопротивление контура;

$\theta_\epsilon = \sqrt{(k_R L_S C)}$ – высокочастотная постоянная времени контура;

$\tau = \frac{t}{\theta_\epsilon}$ – безразмерное время;

$\theta_\eta = L_\mu \frac{r + R}{rR}$ – низкочастотная постоянная времени контура;

$\eta = \frac{\theta_\epsilon}{\theta_\eta}$;

$$\frac{df}{d\tau} = \begin{cases} 0, \tau < 0; \\ \frac{E}{\tau_{\text{вкл}}}, 0 < \tau < \tau_{\text{вкл}}; \\ 0, \tau_{\text{вкл}} < \tau < \tau_H - \tau_{\text{выкл}}; \\ -\frac{E}{\tau_{\text{выкл}}}, \tau_H - \tau_{\text{выкл}} < \tau < \tau_H; \\ 0, \tau > \tau_H. \end{cases} \quad (7)$$

При решении уравнения (5) используем пакет прикладных программ *Electronics Work Bench Pro* [3]. Для удобства вычислений при использовании пакета *Electronics Work Bench Pro* понизим порядок уравнения (5) и введем безразмерное напряжение на нагрузке $v(\tau) = \frac{u(\tau)}{k_R E}$. В результате получим

безразмерное интегро-дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 v}{d\tau^2} + 2\xi \frac{dv}{d\tau} + [1 + k_R(k_L - 1)]v + \eta \int_0^{\tau} v d\tau = g, \quad (8)$$

с начальными условиями

$$v(0) = \frac{dv(0)}{d\tau} = 0, \quad (9)$$

где

$$g(\tau) = \begin{cases} 0, \tau < 0; \\ \frac{\tau}{\tau_{\text{вкл}}}, 0 < \tau < \tau_{\text{вкл}}; \\ 1, \tau_{\text{вкл}} < \tau < \tau_H - \tau_{\text{вкл}}; \\ \frac{\tau_H - \tau}{\tau_{\text{вкл}}}, \tau_H - \tau_{\text{вкл}} < \tau < \tau_H; \\ 0, \tau > \tau_H. \end{cases} \quad (10)$$

В среде *Electronics Work Bench Pro* уравнению (8) с начальными условиями (9) соответствует расчетная модель (рис. 4). Расчетная модель (рис. 4) позволяет с минимальными затратами времени исследовать влияние параметров полупроводникового ключа и импульсного трансформатора на переходной процесс в силовом контуре высоковольтного импульсного источника.

Для важного на практике случая $L_S / L_\mu \ll 1$, что соответствует случаю правильно спроектированного и изготовленного импульсного трансформатора, с помощью расчетной модели (8) исследована зависимость длительности фронта импульса напряжения на нагрузке T_ϕ от времени включения полупроводникового ключа $T_{\text{вкл}}$ и коэффициента затухания контура ξ (рис. 5). В

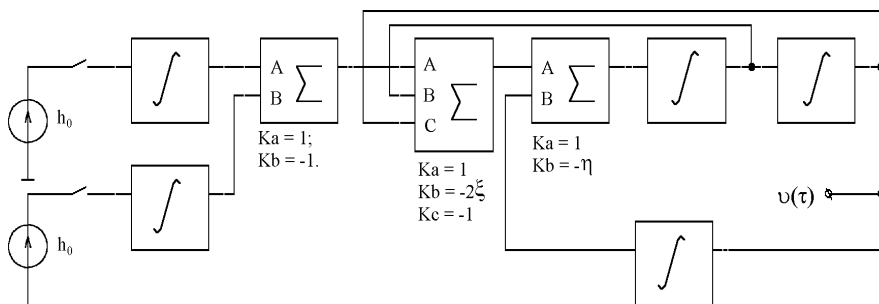


Рисунок 4 – Расчетная модель уравнения (8): Σ – суммирующий блок; \int – интегрирующий блок; k_a , k_b , k_c – масштабирующие множители.

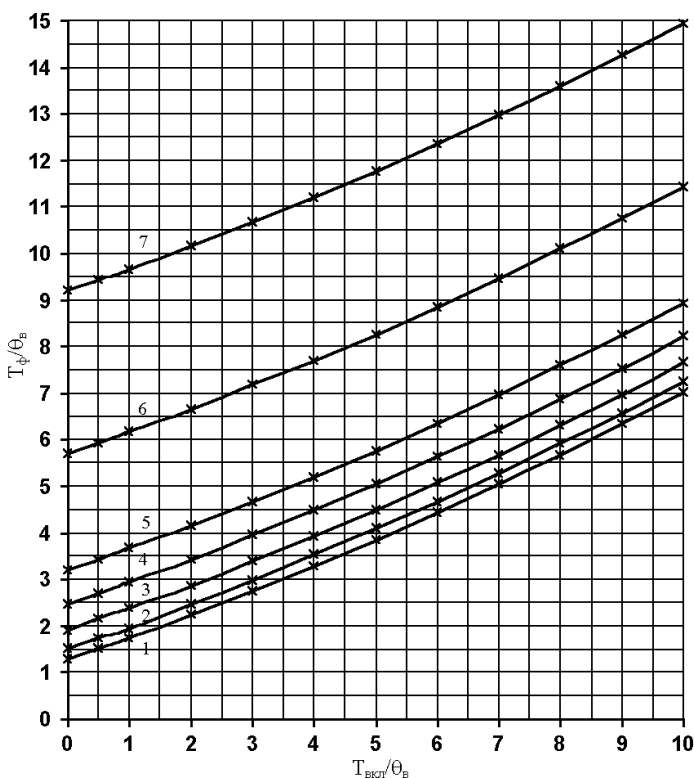


Рисунок 5 – Зависимость длительности фронта T_ϕ от времени включения полупроводникового ключа $T_{вкл}$ и коэффициента затухания ξ (в единицах высокочастотной постоянной времени θ_a): 1 – $\xi = 0,2$; 2 – $\xi = 0,4$; 3 – $\xi = 0,6$; 4 – $\xi = 0,8$; 5 – $\xi = 1,0$; 6 – $\xi = 1,5$; 7 – $\xi = 2,0$.

случае $T_{\text{вкл}} \ll \theta_v$ (для быстродействующих полупроводниковых ключей) зависимость $T_{\phi}(T_{\text{вкл}}, \xi)$ совпадает с зависимостью $T_{\phi}(\xi)$, полученной в [4].

Выводы.

1. В работе уточнена схема замещения импульсного трансформаторного источника. Для этого использована модель полупроводникового ключа с конечными временами включения и выключения.

2. Для уточненной схемы замещения получены интегродифференциальное уравнение для напряжения на нагрузке и расчетная модель в среде *Electronics Work Bench Pro*.

3. С помощью расчетной модели установлена зависимость длительности фронта импульса от коэффициента затухания и времени включения полупроводникового ключа.

Список литературы: 1. С.С.Водвин Проектирование импульсных трансформаторов. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. 2. Л.А.Бессонов Теоретические основы электротехники. Изд. 6-е, перераб. и доп. Учебник для студентов энергетических и электротехнических вузов. – М., Высшая школа, 1973. – 752с. 3. В.И.Карлачук. Электронная лаборатория на IBM PC. Издание 2-е, дополненное и переработанное. – М.: Солон-Р, 2001. – 726 с. 4. Я.С.Ицхоки Импульсные устройства. – М.: Советское радио, 1959 – 728 с.

Поступила в редколлегию 26.04.2008

УДК 621.315

В.С.БЫКОВ; НТУ «ХПИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УСИЛЕНИЯ СВЯЗЕЙ СИСТЕМООБРАЗУЮЩЕЙ СЕТИ ЮЖНОЙ ЭЭС УКРАИНЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УПРАВЛЯЕМЫХ САМОКОМПЕНСИРУЮЩИХСЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

В статті виконано розрахунки режимів роботи кільцевої мережі частини Південної ЕЕС з включенням електропередачі нового типу – УСВЛ, які показали доцільність їх застосування для посилення системоутворюючої мережі ОЕС України.

In given paper the calculations of modes of operations of a circle network of a part of Southern EES with inclusion of transmission line of a new type - USVL were executed which have shown expediency of their application for amplification of a system-forming network OES of Ukraine.

Введение и постановка задачи

Системообразующие сети ОЭС Украины обеспечивают необходимое распределение потоков мощности и выдачу мощности генерирующих источ-